

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

**GÜC ELEKTRONİKASI ÇEVİRİCİLƏRİ ÜÇÜN
İNTELLEKTUAL İDARƏETMƏ SİSTEMİNİN İŞLƏNMƏSİ**

**İxtisas: 3337.01 – İnformasiya-ölçmə və idarəetmə sistemləri
(sahələr üzrə)**

Elm sahəsi: **Texnika elmləri**

İddiaçı: **Elvin Vəli oğlu Yusubov**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2024

Dissertasiya işi Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin
«Cihaz mühəndisliyi» kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər: texnika elmləri doktoru, professor
Lalə Rüstəm qızı Bəkirova

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın müxbir üzvü,
texnika elmləri doktoru, professor
İsmayıl Mahmud oğlu İsmayılov

əməkdar elm xadimi, texnika elmləri
doktoru, professor
Ramiz Topuş oğlu Hübətov

texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Günəl Vaqif qızı Əliyeva

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya
Komissiyasının Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi
Azərbaycan Texniki Universiteti nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.04
Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri: texnika elmləri doktoru, professor
Nurəli Adil oğlu Yusifbəyli

Dissertasiya şurasının
elmi katibi: texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent
Vahid Qara oğlu Fərhadov

Elmi seminarın sədri: texnika elmləri doktoru, dosent
Məzahir Məhəmməd oğlu İsayev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Sürətlə artan enerji tələbatı, ənənəvi enerji mənbələrinin ətraf mühitə vurduğu ziyanın miqyasının genişlənməsi, eyni zamanda bu mənbələrin tükənmək üzrə olması bərpa olunan enerji mənbələrinə xüsusi maraq oyatmışdır. Günəş enerjisi bərpa olunan enerji mənbələrindən biri olub, yüksək perspektivlərə malikdir. Ekoloji cəhətdən ən təmiz enerji növü hesab edilən günəş enerjisi elektrik enerjisinə xüsusi yarımkeçirici materiallardan hazırlanmış fotovoltaiq elementlərdən təşkil olunmuş modullar vasitəsi ilə çevrilir. Lakin fotovoltaiq modulların çıxış gərginliyinin günəş şüalarının intensivliyi və temperatur kimi faktorlardan asılı olması onların çıxış gərginliyinin verilmiş dayaq qiymətində stabilliyini təmin etmək üçün xüsusi sabit cərəyan güc elektronikasası çeviriciləri vasitəsi ilə yük dövrəsinə qoşulmağını zəruri edir. Sabit cərəyan güc elektronikasası çeviricilərinin əsas vəzifəsi giriş gərginliyi və yük cərəyanının müəyyən dəyişmə diapazonunda çıxış gərginliyinin stabilliyini təmin etməkdir. Sabit cərəyan güc elektronikasası çeviriciləri mikroşəbəkələr adlanan kiçik elektrik şəbəkələri daxilində fotovoltaiq modullara qoşulurlar. Fotovoltaiq modullara qoşulmuş sabit cərəyan çeviriciləri isə öz aralarında adətən, çıxışları ümumi magistral sabit gərginlik şininə birləşdirilmiş formada paralel strukturda qoşulurlar.

Mövcud idarəetmə sistemlərinin nisbi mürəkkəbliyi, idarəetmənin lokal-lokal və lokal-üst səviyyələri arasında zəif struktur-funksional əlaqə, idarəetmənin müxtəlif səviyyələrində insan müdaxiləsinə ehtiyacın olması, müxtəlif təsir amilləri şəraitində zəif adaptivlik, dayanıqlıq və enerji itkiləri bu idarəetmə sistemlərinin ən böyük çatışmazlıqlarıdır. Çeviricilərin və bu çeviricilərdən təşkil olunmuş mikroşəbəkənin adaptivliyinin, çeviricilərin qoşulduğu paralel şin gərginliyinin dayanıqlığı kimi keyfiyyət göstəricilərinin, mikroşəbəkənin daxili funksional blokları arasında, eləcə də bu mikroşəbəkənin digər elektrik şəbəkələri ilə optimal enerji mübadiləsinə təşkil edən, enerji itkilərini minimallaşdıran intellektual mərkəzi idarəetmə sisteminin qurulmasına ehtiyac vardır.

Tədqiqatın obyektı və predmeti. Dissertasiya işinin obyektı sabit cərəyan mikroşəbəkələrində sabit cərəyan çeviriciləri və bu çeviricilərdən, enerji mənbələrindən və yük dövrlərindən ibarət olan mikroşəbəkədir. Dissertasiya işinin predmeti isə mikroşəbəkənin idarəetmə sisteminin intellektual modelinin işlənilməsidir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Dissertasiya işinin əsas məqsədi müxtəlif həyəcanlandırıcı təsirlər şəraitində güc elektronikasını çeviricilərindən, enerji mənbələrindən və yük dövrlərindən ibarət olan sabit cərəyan mikroşəbəkələrində idarəetmənin müxtəlif səviyyələrində insan müdaxiləsini minimallaşdırmağa imkan verən intellektual idarəetmə sisteminin işlənməsidir. Dissertasiya işinin əsas vəzifələri aşağıdakılardır:

- 1) Mikroşəbəkənin qeyri-müəyyənlik şəraitində avtonom, adaptiv və dayanıqlı iş rejiminin təmin edilməsi;
- 2) Fotovoltaik modulların çıxış parametrlərinin ölçmə nəticələri əsasında maksimum çıxış gücünün əldə edilməsi məsələlərinin həlli;
- 3) Sabit cərəyan güc elektronikasını çeviriciləri arasında güc paylanması məsələlərinin həlli;
- 4) Mikroşəbəkələrdə bərpa olunan enerji mənbələri, enerji yığıma-vermə modulları və digər elektrik şəbəkələri arasında optimal idarəetmə məsələlərinin həlli;
- 5) Mikroşəbəkənin intellektual informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin yeni struktur-funksional modelinin işlənilməsi.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində metaevristik optimallaşdırma metodlarından, ölçmə və xətlər nəzəriyyəsi, qeyri-xətti idarəetmədən, virtual müqavimətlər metodundan, fotovoltaik modullardan maksimum gücün əldə edilməsi alqoritmlərindən, avtomatik tənzimləmə nəzəriyyəsi istifadə olunmuşdur. Kompüter simulyasiyaları MATLAB və SİMULİNK mühitində aparılmışdır.

Müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar. Dissertasiya işində aşağıdakı müddəalar müdafiyyə təqdim olunur:

-Optimal idarəetmənin yerinə yetirilməsi üçün çeviricilərin çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsinin və şin gərginliyi xətlərinin minimallaşdırılması;

-Mikroşəbəkələrdə idarəetmənin hər üç səviyyəsində iştirak edən çoxsaylı PİD tənzimləyicilərinin intellektuallaşdırılması;

-Sabit cərəyan mikroşəbəkələrində yarımkölgə fiziki hadisəsinin təsiri altında olan fotovoltaiq modulların çıxış parametrlərinin ölçmə nəticələri əsasında maksimum çıxış gücünün əldə edilməsi üçün yeni üsulun işlənilməsi;

-Sabit cərəyan mikroşəbəkələrində yük dövrlərinin fasiləsiz enerji ilə təmin olunması məsələlərini optimal həll edən intellektual idarəetmə sisteminin yeni funksional modelinin işlənilməsi.

Tədqiqatın elmi yeniliyi. Tədqiqatın əsas elmi yenilikləri aşağıdakılardır:

- İlk dəfə olaraq, optimal idarəetmənin yerinə yetirilməsi üçün çeviricilərin çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsinin və şin gərginliyi xətlərinin intellektual metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə minimallaşdırılması məsələsi həll edilmişdir [5, 6];
- Fotovoltaiq modullara qoşulmuş qeyri-xətti xarakteristikaya malik sabit cərəyan güc elektronikasası çeviricilərinin çıxış xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması üçün bu çeviricilərin idarəetmənin müxtəlif səviyyələrində iştirak edən PİD tənzimləyicilərinin intellektuallaşdırılması məsələsi həll edilmişdir [1-4];
- Fotovoltaiq modulların çıxış parametrlərinin ölçmə nəticələri əsasında maksimum çıxış gücünün əldə edilməsinə imkan verən metaevristik MOS-FLEYM alqoritmlə maksimum güc nöqtəsini izləyən yeni üsul işlənilmişdir [5, 7, 8];
- Sabit cərəyan mikroşəbəkələrində yük dövrlərinin fasiləsiz enerji ilə təmin olunması üçün mikroşəbəkənin daxili funksional blokları, eləcə də bu mikroşəbəkənin başqa mikroşəbəkələrlə və ya dövlət enerji şəbəkəsi ilə optimal enerji mübadiləsini həyata keçirmək imkanına malik olan intellektual

idarəetmə sisteminin yeni funksional modeli işlənilmişdir [10,12,15].

Tədqiqatın nəzəri və praktik əhəmiyyəti. Əldə edilmiş əsas nəticələr mühüm nəzəri və tətbiqi əhəmiyyətə malikdir.

İşin nəzəri əhəmiyyəti–Dissertasiya işində mikroşəbəkənin intellektual informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin struktur və funksional modelləri işlənilmiş; metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə mikroşəbəkənin idarəetmə metodlarının optimallaşdırılmasının yeni üsulları işlənilib təqdim edilmiş; sabit cərəyan mikroşəbəkələrinin intellektual idarəetmə sisteminin qurulması üçün müvafiq güc elektronikasası çeviricilərinin seçilmə metodikası verilmiş; bu çeviricilərin vəziyyət tənlikləri, ötürmə funksiyaları, eləcə də sirkulyasiya cərəyanlarının riyazi modeli əldə edilmişdir. Təqdim edilmiş metod və modellər universal xarakter daşıyır və bu sahədə nəzəri tədqiqatların davam etdirilməsi nöqtəyi-nəzərdən xüsusi əhəmiyyətə malikdir.

İşin praktiki əhəmiyyəti–təklif edilən intellektual idarəetmə sistemi uzaqlaşdırılmış ölçmə-nəzarət məntəqələrinin, seysmik, telekommunikasiya və meteoroloji stansiyaların, biotibbi avadanlıqların, ucqar yaşayış və tibb məntəqələrinin, ağıllı şəhər və kəndlərin, elektrik avtomobillərin, pilotsuz uçan aparatların, gəmilərin və digər hərəkət edən obyektlərin qismən və ya tam enerji təchizatı məsələlərinin həllində müvəffəqiyyətlə tətbiq oluna bilər.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işinin əsas tədqiqat və praktiki nəticələrinin Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin “Cihaz mühəndisliyi” kafedrasında tədris olunan “Kompüterli-informasiya ölçmə sistemlərində intellektual ölçmə vasitələri”, “Elektronika və sxemotexnika” fənlərinin mühazirə və laboratoriya dərslərinin yerinə yetirilməsində, həmçinin “Cihaz mühəndisliyi” kafedrasında aparılmış elmi-tədqiqat işlərində istifadə olunması tətbiq akt ilə təsdiq edilmişdir. Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı beynəlxalq konfranslarda müzakirə olunmuşdur: International Conference Automatics and Informatics (ICAI-2021), 30 Sept.-2 Oct. 2021, Varna, Bulgaria; International Scientific and Practical Conference «Intellectual Systems and Information

Technologies», September 13–19, 2021, Odesa, Ukraine; International Conference Automatics and Informatics (ICAI-2022), 6-8 Oct. 2022, Varna, Bulgaria; The third international scientific-practical conference -Modern Information, Measurement, and Control systems: problems, applications and perspectives (MIMCS-2022), November 04-05, 2022, Antalya, Türkiye; IFAC Workshop on Control for Smart Cities (CSC 2022), 27–30 June 2022, Sozopol, Bulgaria; International Conference on Electronics, Engineering Physics and Earth Science (EEPES 2023), June 21-23, 2023, Kavala, Greece; International Conference on Industry Sciences & Computer Sciences Innovation (iSCSI'23), October 04-06, 2023, Lisbon, Portugal.

Dissertasiya işinin mövzusunə uyğun 15 elmi iş, o cümlədən 8 məqalə, 7 elmi-konfrans materialı, 2 həmmüəllifsiz məqalə dərc etdirilmişdir. Bunlardan, 8-i “SCOPUS”, 1-i isə “Web of Science” elmi bazalarında indekslənməmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilat: Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi, Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universitetinin “Cihaz mühəndisliyi” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Müəllifin şəxsi iştirakı: Dissertasiya işinin məqsədi, müdafiəyə çıxarılan müddəalar, müqayisəli təhlillər, işlənmiş yeni intellektual üsul və struktur-funksional modellər, aparılmış riyazi hesablamalar, sxemlərin tərtibatı, əldə edilmiş simulyasiya və eksperimental nəticələr şəxsən müəllifə aiddir.

Dissertasiyanın həcmi və quruluşu: Dissertasiya işi Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyası tərəfindən qoyulan tələblərə uyğun qaydada yazılmışdır. Dissertasiya işi giriş, üç fəsil, nəticə və istinad olunan ədəbiyyatdan ibarətdir.

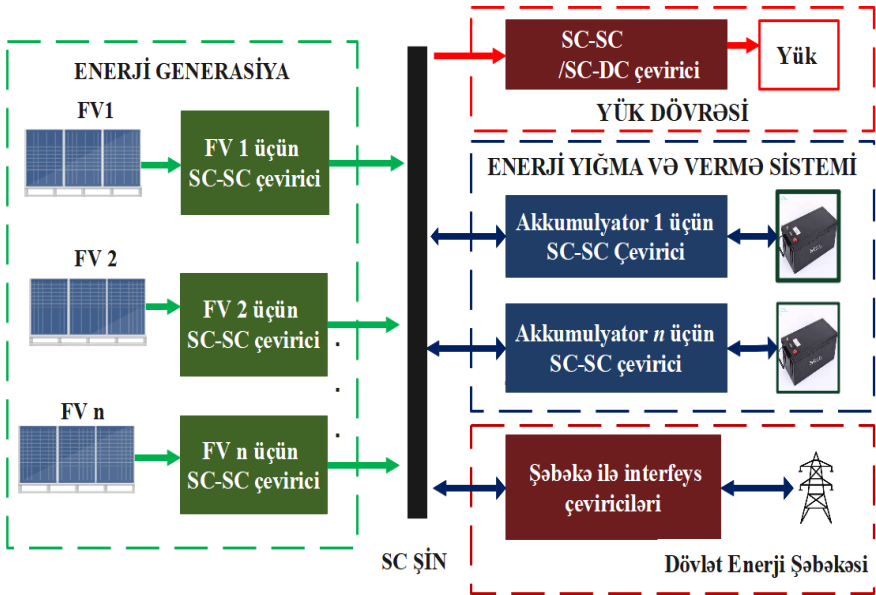
Dissertasiya işinin girişi 32059, I fəsil 73283 işarə, II fəsil 40834 işarə, III fəsil 51959 işarə, nəticə 2292 işarədən ibarət olmaqla ümumilikdə 200427 işarədən ibarət mətnə şərh olunmuşdur.

İŞİN QISA MƏZMUNU

Girişdə mövzu sahəsinin aktuallığı, tədqiqatın məqsəd və vəzifələri, müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, tədqiqat metodları, tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti qeyd olunmuşdur.

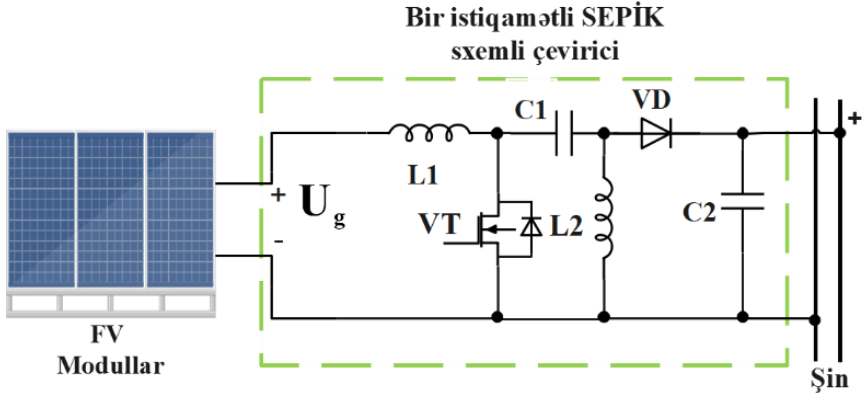
Fəsil 1-də güc elektronikasası çeviricilərinin geniş təsnifatlandırılması aparılmış, onların əsas növləri müqayisəli formada tədqiq edilmiş, FV modullara qoşulmaq üçün bir istiqamətli SEPİK sxemli, akkumulyatorla interfeysin təşkili üçün iki istiqamətli SEPİK-ZETA sxemli sabit cərəyan çeviriciləri seçilmiş, intellektual idarəetmə sisteminin qurulması üçün metaevristik MOS-FLEYM optimallaşdırma metodu seçilmiş, onların vəziyyət tənlikləri və ötürmə funksiyaları əldə edilmişdir. Burada həmçinin güc elektronikasası çeviricilərinin tənzimləmə metodlarının müqayisəli təhlili də verilmişdir.

Şəkil 1-də SC mikroşəbəkələrinin struktur sxemi göstərilmişdir.



Şəkil 1. Sabit cərəyan mikroşəbəkələrinin struktur sxemi

Mikroşəbəkə dedikdə enerji mənbələri, yük dövrləri və güc elektronikasısı çeviricilərindən ibarət müstəqil fəaliyyət göstərə bilən kiçik elektrik şəbəkələri nəzərdə tutulmuşdur. SC güc elektronikasısı çeviricilərinin əsas vəzifəsi kontrollerdən gələn siqnalara müvafiq olaraq SC şin gərginliyini və gücünü tənzimləməkdir. Şəkil 2-də bir istiqamətli SEPİK sxemli çeviricinin FV modula və şinə qoşulma sxemi verilmişdir.



Şəkil 2. Bir istiqamətli SEPİK sxemli çeviricinin FV modula və şinə qoşulma sxemi

Giriş gərginliyi ilə müqayisədə daha böyük və ya kiçik çıxış gərginlikləri yarada bilmə imkanına sahib olması, döyünən yük cərəyanına malik olmaması, çıxış gərginliyinin inverslənməyən olması və daha yüksək faydalı iş əmsalına malik olması səbəbindən SEPİK sxemli çeviricilər FV modullara qoşulmaq üçün bir istiqamətli çevirici olaraq seçilmişdir. SC çeviricilərinin ümumiləşdirilmiş vəziyyət tənlikləri, bu çeviricilərdə elektron açar rejimində fəaliyyət göstərən tranzistorların qapalı və açıq rejimlərini xarakterizə edən dinamik tənliklərinin ümumiləşdirilmiş riyazi modeldə birləşdirilməsi ilə əldə edilmişdir.

SEPİK sxemli çeviricinin ümumiləşdirilmiş vəziyyət tənlikləri aşağıda verilmiş riyazi ifadə ilə göstərilmişdir:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \frac{du_{C1}}{dt} \\ \frac{du_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-(1-d)}{L_1} & \frac{-(1-d)}{L_1} \\ 0 & 0 & \frac{d}{L_2} & \frac{-(1-d)}{L_2} \\ \frac{(1-d)}{C_1} & \frac{-d}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{(1-d)}{C_2} & \frac{(1-d)}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [U_g], \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ u_{C1} \\ u_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_g. \quad (2)$$

Burada, i_{L1} və i_{L2} induktiv sargac cərəyanlarını, u_{C1} və u_{C2} kondensatorların üzərindəki gərginlik düşkülərini, U_g giriş gərginliyini, d və $1-d$ doldurma əmsalları olub, tranzistorun qapalı və açıq kommutasiya rejimlərini xarakterizə edir.

Vəziyyət tənliliklərindən istifadə edərək SEPİK sxemli çeviricinin tranzistoruna verilən impulsun davam etmə müddətini xarakterizə edən doldurma əmsalının qiyməti və çıxış gərginliyini əlaqələndirən ötürmə funksiyasını əldə etmək mümkündür. İnduktiv sargac $L1$ və $L2$ -nin qiymətləri 3.6mH, kondensator $C1$ və $C2$ -nin qiymətləri 19mF, yük müqaviməti 5 Om seçilmişdir. Verilənləri nəzərə alaraq aşağıdakı ötürmə funksiyaları əldə edilmişdir:

$$\frac{U_{çixış}(s)}{d(s)} = \frac{-1.74 \cdot 10^{-7} s^3 + 4 \cdot 10^{-5} s^2 - 0.0018s + 0.5887}{1.3 \cdot 10^{-9} s^4 + 2 \cdot 10^{-8} s^3 + 1.8 \cdot 10^{-5} s^2 + 1.7 \cdot 10^{-4} s + 0.05}. \quad (3)$$

$$\frac{U_{çixış}(s)}{U_{giriş}(s)} = \frac{1.3 \cdot 10^{-4} s^2 + 1.4}{1.5 \cdot 10^{-8} s^4 + 2.5 \cdot 10^{-7} s^3 - 2 \cdot 10^{-4} s^2 + 0.002s + 1.4 \cdot 10^{-4}}. \quad (4)$$

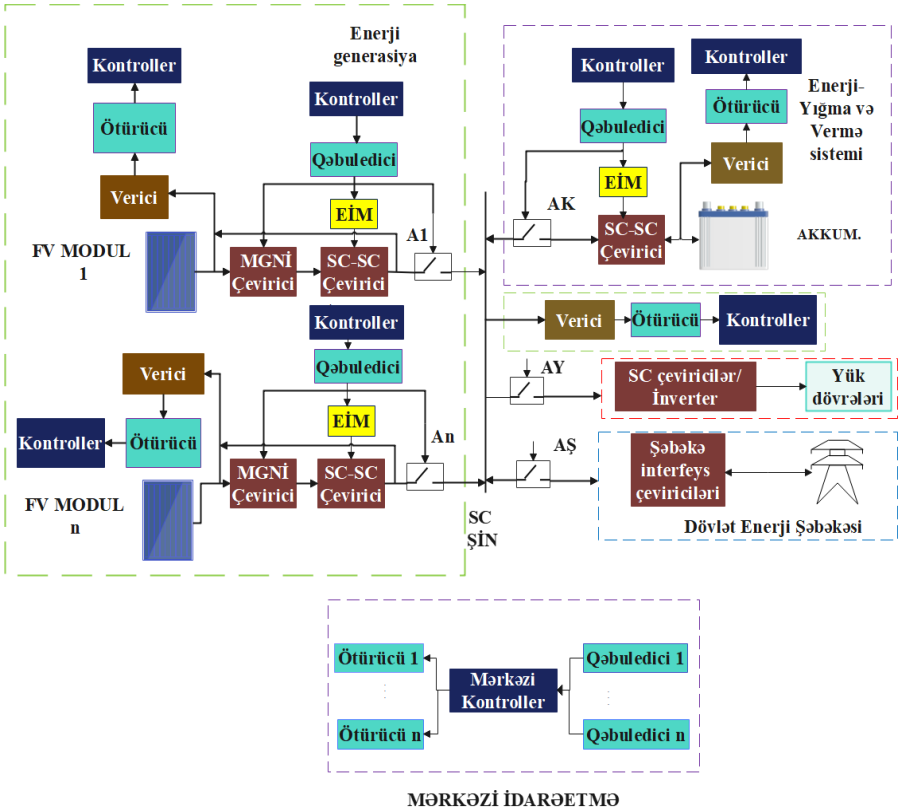
Bu fəsilə, həmçinin ənənəvi optimallaşdırma üsulları ilə intellektual metaevristik optimallaşdırma üsulları müqayisəli təhlil edilmişdir. SC mikroşəbəkələrin intellektual idarəetmə sisteminin

qurulmasında metaevristik alqoritmlərin aşağıdakı üstünlüklərə malik olması müəyyən edilmişdir:

1. Özünüöyrətmə mexanizmlərinə malik olması;
2. Qeyri-müəyyənlik şəraitində qərar vermə qabiliyyətinə malik olması;
3. Kəsilən, törəməsi müəyyən olmayan nöqtələrə malik məqsəd funksiyalarına tətbiq edilə bilmə imkanı;
4. Diferensial tənliklərdən istifadə edilməməsi;
5. Lokal ekstremumda ilişməməsi;
6. Məhdud və qeyri-müəyyən informasiyaya malik olan proseslərə tətbiqi imkanı;
7. Mikrokontrollerlərin verilənləri emal prosesini asanlaşdırması;
8. Adaptivlik və avtonomluq;
9. Qısa müddət ərzində optimal həllə çatma imkanının olması.

Fəsil 2-də sabit cərəyan mikroşəbəkələrinin informasiya-ölçmə və idarəetmə sistemlərinin, eləcə də avtomatik ölçmə, nəzarət və diaqnostik struktur-funksional modelləri, SC mikroşəbəkələrdə meydana gələn sirkulyasiya cərəyanlarının riyazi modeli işlənmiş, küylərin ölçmə siqnallarına təsiri rəqəm süzgəcləri ilə minimallaşdırılmışdır. Mikroşəbəkələrdə intellektual idarəetmə sisteminin qurulması üçün müvafiq informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin struktur-funksional modelinin işlənilməsi zəruridir. Mikroşəbəkələrinin informasiya-ölçmə sistemi özündə avtomatik ölçmə və nəzarət, texniki-diaqnostika, çıxış gücünü proqnozlaşdırma sistemlərini cəmləşdirir. SC mikroşəbəkələrində çeviricilərin çıxış gərginliyinin stabilliyi, çıxış gücünün paylanması, FV modullardan maksimum gücün əldə edilməsi kimi zəruri məsələlərinin həlli üçün çeviricilərin və modulların çıxış gərginlik və cərəyanlarının qiymətlərinin real-zamanda ölçülməsinə ehtiyac vardır.

Dissertasiya işində bütün idarəetmə prosesi verilmiş mikroşəbəkənin təklif edilmiş informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin struktur modelinə əsasən həyata keçirilmişdir. Şəkil 3-də təklif edilmiş informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin struktur modeli verilmişdir.

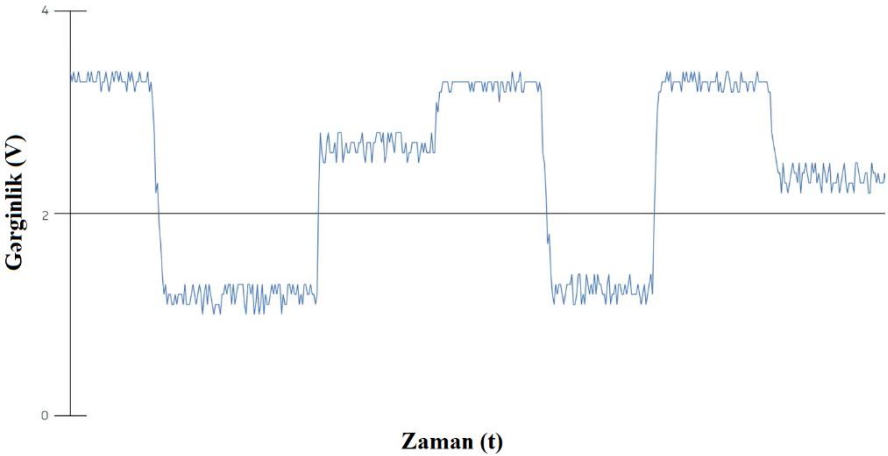


Şəkil 3. Fotovoltaik mikroşəbəkələr üçün informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin struktur modeli

Burada müxtəlif ölçmə-nəzarət, diaqnostika və proqnozlaşdırma əməliyyatları yerinə yetirilir. Vericilər vasitəsi ilə FV modulların, çeviricilərin və akkumulyatorların gərginlik, cərəyan, temperatur kimi parametrləri real-zamanda ölçülür. Əldə edilmiş ölçmə nəticələri ötürücülər vasitəsi ilə mərkəzi kontrollerə ötürülür. Mərkəzi kontrollerdə bu verilənlər emal edildikdən sonra, müvafiq idarəedici siqnallar generasiya edilərək ötürülür. Vericilərdən əldə edilmiş ölçmə və kontrollerdən gələn idarəetmə siqnallarının ötürülməsi həm naqilli, həm də naqilsiz mühitdə aparıla bilər. Qəbuledicilər vasitəsi ilə

idarəetmə siqnalları əldə edilir və eninə impuls modulyatorunda (EİM) müvafiq impulslar hasil edilərək çeviricilərin tranzistorlarına verilir. Mikroşəbəkənin ölçmə-nəzarət və diaqnostika sistemləri çeviricilərdə ciddi nasazlıqlar aşkar etdikdə, mikroşəbəkənin mərkəzi idarəetmə sistemi dərhal müvafiq çeviricini şindən idarəolunan açarlar (AK, AY, AŞ, A1..An) vasitəsi ilə ayıraraq, şin gərginliyinin dayanıqlığını qoruyur.

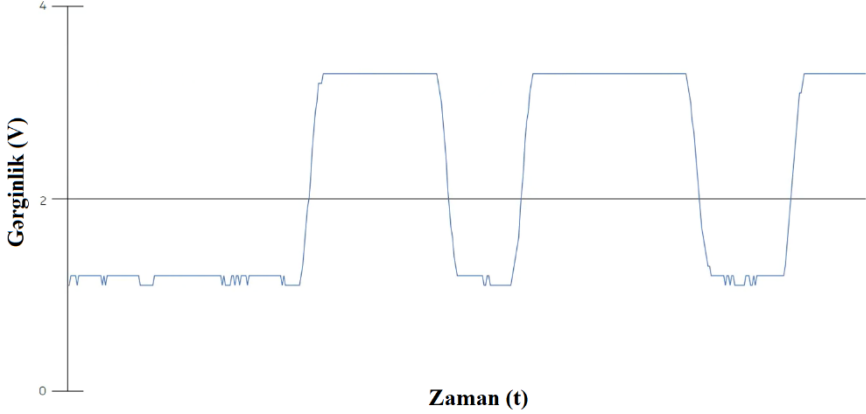
İdarəetmə prosesinin keyfiyyətinin yüksəldilməsi üçün ölçmə siqnallarının küylərdən təmizlənməsi zəruridir. Şəkil 4-də küylərin təsirinə məruz qalmış ölçmə siqnalının STM32F4 mikrokontrolleri tərəfindən kompüterə ötürülmüş real-zamanlı qiymətləri əks etdirilmişdir.



Şəkil 4. Küylərin təsirinə məruz qalmış ölçmə siqnalı

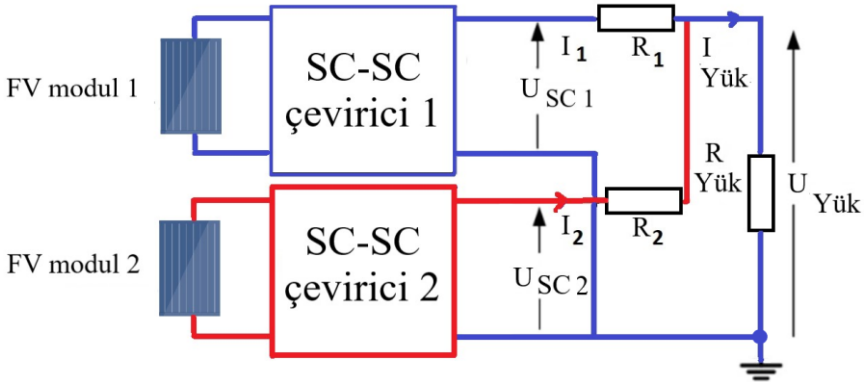
İşdə ölçmə siqnallarının yüksək tezlikli küylərdən təmizlənməsi üçün siqnalın orta qiymətinin tapılmasına əsaslanan rəqəm süzgəclənməsi üsulundan istifadə edilmişdir. Çeviricilərin real-zamanda ölçülmüş çıxış gərginlikləri mikrokontrollerə ötürülmüşdür. Ölçmə siqnalları mikrokontrollerin 0-3.3V gərginliklərinə uyğunlaşdırılmışdır. Nəticədən görüldüyü kimi, əldə edilmiş ölçmə siqnallarında yüksək tezlikli küylər müşahidə edilmişdir. İşlənmiş rəqəm süzgəcləri vasitəsi

ilə bu küylər proqram səviyyəsində əhəmiyyətli dərəcədə azaldılmışdır. Şəkil 5-də küylərin səviyyəsi minimallaşdırılmış ölçmə signalının STM32F4 mikrokontrolleri tərəfindən kompüterə real-zamanlı qiymətləri əks etdirilmişdir.



Şəkil 5. Küylərin təsiri minimallaşdırılmış ölçmə signalı

Şəkil 6-da FV modullarla sabit gərginliklə işləyən yük dövrəsini əlaqələndirən iki SC-SC çeviricisi təsvir edilmişdir.



Şəkil 6. Paralel strukturda vahid şinə qoşulmuş müxtəlif çıxış gərginlikli sabit cərəyan çeviriciləri

Çoxsaylı SC-SC çeviricilərinin SC mikroşəbəkələrində paralel birləşdirilməsi zamanı diqqət yetirilməli əsas məqamlara çeviricilərin çıxış gərginliklərinin tənzimlənməsi, onlar arasında gücün paylanma fərqlərinin minimallaşdırılması və sirkulyasiya cərəyanının mövcudluğu daxildir. Paralel strukturda eyni gərginlik şininə birləşdirilmiş çeviricilərin çıxış gərginliklərinin qiyməti bərabər olduğu halda, çeviricilərin çıxış cərəyanlarının bərabər paylanması mümkün olur. Çeviricilərin çıxış gərginliklərinin qeyri-bərabər qiymətlərində sirkulyasiya cərəyanları fiziki hadisəsi baş verir. Əldə edilmiş riyazi ifadələrdən məlum olmuşdur ki, cərəyanın paylanma fərqi hər bir çeviricinin çıxış gərginliyi və naqilin parazit müqavimətindən asılıdır. İki çeviricili sistem üçün sirkulyasiya cərəyanının Kirxhofun qanunları əsasında riyazi analizi aşağıda aparılmışdır:

$$I_{12} = -I_{21} = \frac{U_{SC1} - U_{SC2}}{R_1 + R_2} = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

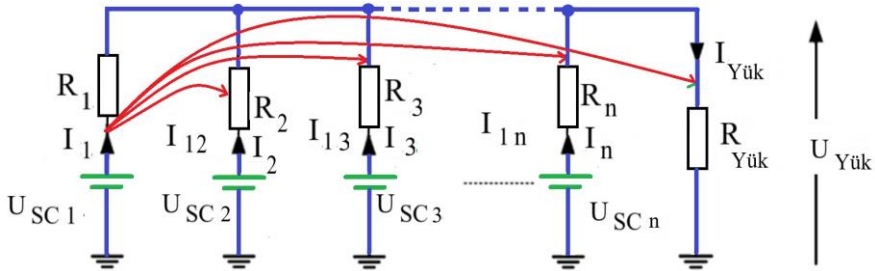
Burada, U_{SC1} , U_{SC2} , R_1 və R_2 müvafiq olaraq birinci və ikinci çeviricinin çıxış gərginlikləri və naqilin parazit müqavimətləri, I_1 və I_2 müvafiq olaraq birinci və ikinci çeviricinin çıxış cərəyanları, I_{12} isə birinci çeviricidən ikinci çeviriciyə doğru istiqamətlənmiş sirkulyasiya cərəyanıdır.

Çeviricilərin sayı birdən çox olduqda, yuxarıda qurulmuş düsturlar aşağıdakı ifadə ilə ümumiləşdirilmişdir:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m \neq 1}^n \left(\frac{1}{R_1 + R_m} \right) & \left(\frac{-1}{R_1 + R_m} \right) \\ \vdots & \vdots \\ \left(\frac{-1}{R_n + R_1} \right) & \dots \sum_{m \neq n}^{n-1} \left(\frac{1}{R_1 + R_m} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{SC1} \\ \vdots \\ U_{SCj} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Şəkil 7-də sabit gərginlikli yük müqaviməti üçün paralel birləşdirilmiş n saylı çeviricilər göstərilmişdir.



Şəkil 7. Vahid şinə qoşulmuş müxtəlif çıxış gərginlikli n saylı sabit cərəyan çeviricilərinin ekvivalent elektrik sxemi

Fəsil 3-də metaevristik MOS-FLEYM optimallaşdırma (MFO) metodu ilə SC mikroşəbəkələrinin intellektual idarəetmə sisteminin ümumiləşdirilmiş funksional modeli, intellektual metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə çeviricilərin çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meylətməsinin və şin gərginliyi xətalalarının minimallaşdırılması, FV modullardan maksimum çıxış gücünün əldə edilməsi və PİD tənzimləyicilərin intellektuallaşdırılması məsələləri həll edilmiş və müvafiq simulyasiyalar yerinə yetirilmişdir.

Mikroşəbəkənin idarəetmə sisteminin hər üç səviyyəsində iştirak edən çoxsaylı PİD tənzimləyicilərinin sazlanma məsələlərinin həll edilməsi xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Statik parametr qiymətlərinə malik olan PİD tənzimləyicilərinin SC çeviricilərində mövcud olan qeyri-xətti, mürəkkəb və dinamik proseslərdə arzuolunan dinamik və statik xarakteristikalarına malik olmaması müəyyən edilmişdir. Belə şərtlər daxilində PİD tənzimləyicilərin xarakteristikalarının yaxşılaşdırılması üçün MFO alqoritmi seçilmişdir. Metaevristik alqoritmlər qrupuna daxil olan MFO optimallaşdırma metodu digər metodlarla müqayisədə optimal həllə yüksək yaxınlaşma sürəti ilə seçilir¹. MFO alqoritmi ilə xarakteristikaları yaxşılaşdırılmış PİD

¹ Elvin Yusubov, Lala Bekirova, A Moth-Flame Optimized Robust PID controller for a SEPIC in Photovoltaic Applications, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 11, 2022, Pages 120-125, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.059>.

tənzimləyici adaptiv sazlama parametrlərinə malik olmaqla dinamik, mürəkkəb proseslərin real-zamanlı idarə edilməsində yüksək effektivliyə nail olmuşdur. MFO alqoritmi ilə dissertasiya işində qarşıya qoyulmuş PİD tənzimləyicilərin yaxşılaşdırılması məsələlərinin həlli üçün əvvəlcə təsadüfi M_{PiD} potensial həllər matrisi qurulmuşdur. Potensial həllər verilmiş məsələnin həlli üçün təklif edilmiş həllər çoxluğuudur. Qurulmuş potensial həllər matrisində MFO kontrolleri ilə generasiya edilmiş proporsional, inteqral və diferensial sazlama parametrlərinin qiymətləri saxlanılmışdır. Sazlanma parametrlərinin hər birinə müvafiq olaraq üç ölçülü potensial həllər matrisi seçilmişdir:

$$M_{PiD} = \begin{bmatrix} m(p)_{1,1} & m(i)_{1,2} & m(d)_{1,3} \\ m(p)_{2,1} & m(i)_{2,2} & m(d)_{2,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m(p)_{n,1} & m(i)_{n,2} & m(d)_{n,3} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Burada n -potensial həllərin sayıdır. Sütunların sayı dəyişənlərin (sistemin ölçüsü) sayıdır.

Güc paylanması məsələlərini həll edən virtual müqavimətlər metodunun MOS-FLEYM alqoritmi ilə optimallaşdırılması zamanı və maksimum çıxış gücünü izləmə kontrolleri üçün bir ölçülü potensial həllər matrisindən istifadə edilmişdir:

$$M_{VM,MGNI} = \begin{bmatrix} m_{1,1} \\ m_{2,1} \\ \vdots \\ m_{3,1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Potensial həllərin ilkin çoxluğunun generasiyası aşağıdakı funksiya müvafiq olaraq həyata keçirilir²:

$$M_{i,j} = (ub(i) - lb(j)) * rand() + lb(i). \quad (9)$$

² Mirjalili S. Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. Knowl Based Syst, 2015 Nov; 89:228-49. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>

Göründüyü kimi burada aşağı və yuxarı hədləri müəyyənləşdirən, müvafiq olaraq qeyd edilmiş \mathbf{lb} və \mathbf{ub} vektorlarından istifadə edilmişdir.

Məqsəd funksiyasının qiymətini saxlamaq üçün müvafiq \mathbf{OM} matrisi qurulmuşdur:

$$\mathbf{OM}_{PID,VM,MGNi} = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_n \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Burada n -potensial həllərin sayıdır.

Bənzər qaydada \mathbf{F} əlverişli həllər matrisi qurulmuşdur. Qeyd etmək lazımdır ki, potensial və əlverişli həllər matrislərinin hər ikisi də həllərdir. Əlverişli həllər potensial həllər arasından seçilmiş və verilmiş optimallaşdırma məsələsi üçün ən münasib həllər vektorlarıdır. Əsas yeniləmə mexanizmi olaraq ənənəvi spiral funksiyası seçilmişdir ³:

$$S(\mathbf{M}_i, \mathbf{F}_j) = |\mathbf{F}_j - \mathbf{M}_i| e^{bk} \cos(2\pi k) + \mathbf{F}_j. \quad (11)$$

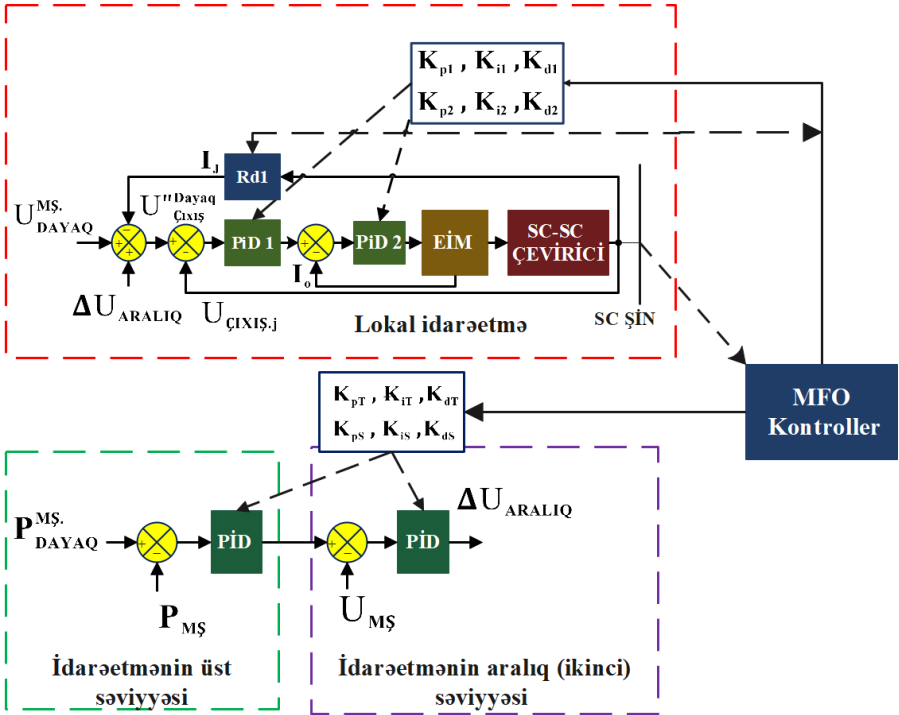
Burada, \mathbf{M}_i - i -ci potensial həlli, \mathbf{F}_j - j -ci əlverişli həlli, S isə spiral funksiyanı təsvir edir; b -spiralın formasını müəyyən edən əmsal, k isə $(-1, 1)$ intervalında seçilmiş təsadüfi ədəddir.

İşlənmiş MFO-PİD tənzimləyicinin dinamik və statik xarakteristikalarının qiymətləndirilməsi üçün müvafiq kompüter simulyasiyaları “MATLAB/SIMULINK” mühitində edilmiş və fiziki model işlənmişdir. Simulyasiyalar iki mərhələdə aparılmışdır. Birinci mərhələdə, işlənmiş MFO-PİD tənzimləyicinin dayaq gərginliyini izləmə qabiliyyəti FV modulunun çıxış gərginliyinin temperatur və günəş şüalarının intensivliyindən asılı dəyişmələrini imitasiya edən giriş gərginliyinin variasiyaları daxilində həyata keçirilmişdir. İkinci mərhələdə, yük müqavimətinin fərqli

³ Shehab, M., Abualigah, L., Al Hamad, H. et al. Moth–flame optimization algorithm: variants and applications. *Neural Comput & Applic* 32, 9859–9884 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04570-6>

qiymətlərində dayaq gərginliyinin izlənmə qabiliyyəti sınaqdan keçirilmişdir.

Şəkil 8-də MFO algoritmi ilə yaxşılaşdırılmış PİD tənzimləyicili SC mikroşəbəkələrinin iyerarxik idarətmə sisteminin struktur-funksional sxemi verilmişdir.

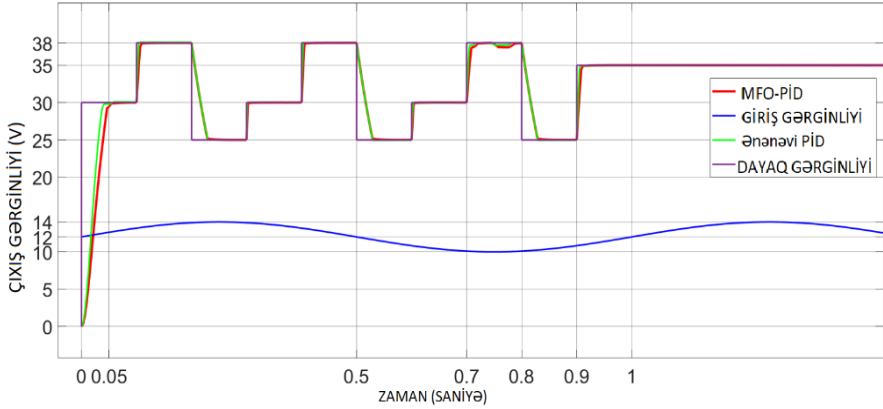


Şəkil 8. MFO algoritmi ilə optimallaşdırılmış PİD tənzimləyicili SC mikroşəbəkələrinin iyerarxik idarətmə sisteminin modeli

İşlənilmiş modeldən göründüyü kimi idarətmənin hər üç səviyyəsində yerləşən çoxsaylı PİD tənzimləyicilərin sazlanma parametrlərini MFO algoritmi vasitəsi ilə adaptivləşdirmək mümkündür. İdarətməni üst və aralıq səviyyələrində 1, lokal

səviyyələrdə isə hər bir çeviriciyə uyğun olaraq 2-yə qədər PİD tənzimləyiciləri mövcuddur.

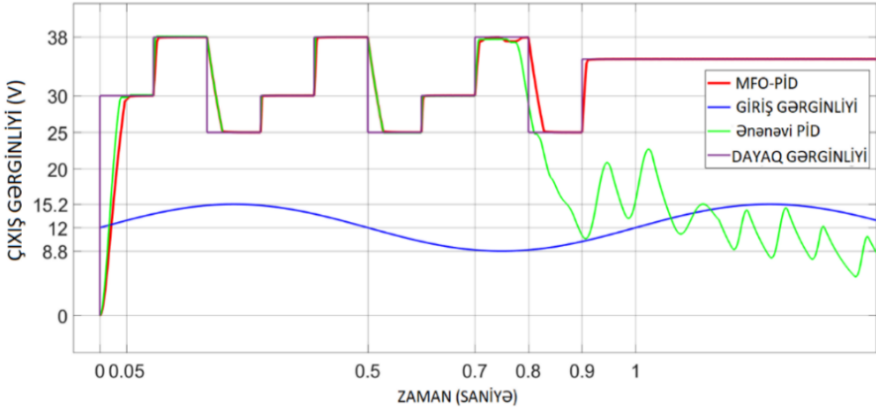
Şəkil 9-da MFO və ənənəvi Ziqler-Nikols metodları ilə sazlanmış PİD tənzimləyicilərin giriş gərginliyinin 10V-dan 14V-a qədər 1Hz tezlikdə və 7Ω yük müqavimətinin təsiri altında dayaq gərginliyinin müxtəlif qiymətlərini izləmə xarakteristikaları nümayiş etdirilmişdir.



Şəkil 9. 4V giriş gərginliyi variasiyasında keçid prosesi

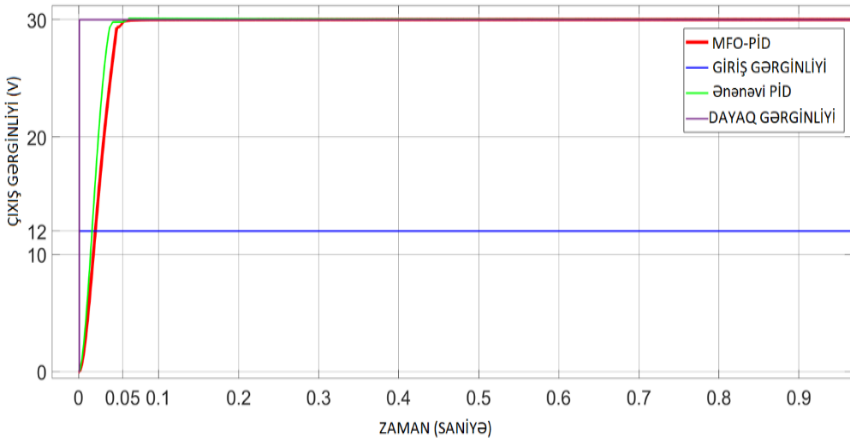
Simulyasiya nəticələrindən göründüyü kimi, hər iki optimallaşdırılmış MFO-PİD və ənənəvi üsul ilə sazlanmış PİD tənzimləyiciləri giriş gərginliyinin 10-14V periodik dəyişmələrində dayaq gərginliyini müvəfəqiyyətlə izləyə bilmişdir. Qeyd edək ki, giriş gərginliyinin bu dəyişmələri günəş modullarının çıxış gərginliyi variasiyalarını imitasiya edir.

Şəkil 10-da isə bənzər sınaq giriş gərginliyinin 8.8V-dan 15.2V-a qədər dəyişən qiymətlərində aparılmışdır. MFO-PİD tənzimləyicisinin dayaq gərginliyinin dəyişən qiymətlərini uğurla izləməsinə baxmayaraq, ənənəvi üsul ilə sazlanmış PİD tənzimləyici verilmiş zaman anındakı dayaq gərginliyi qiymətini 0.8-ci saniyədən başlayaraq izləyə bilməmiş və öz dayanıqlığını itirmişdir.

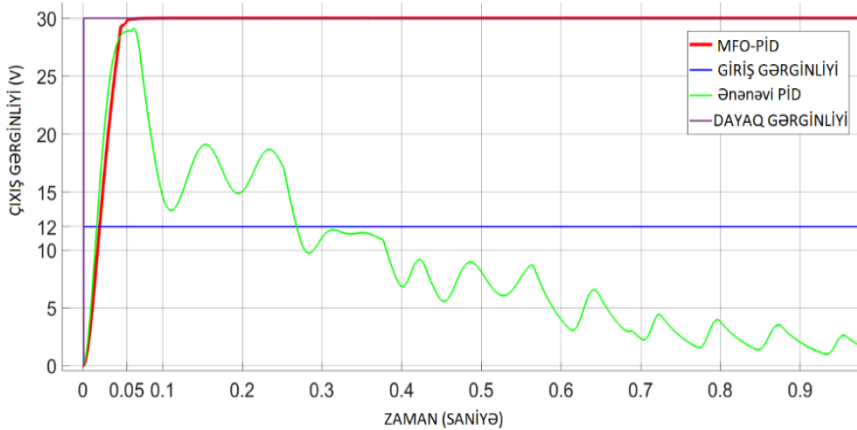


Şəkil 10. 6.4V giriş gərginliyi variasiyasında keçid prosesi

Şəkil 11 və Şəkil 12-də hər iki tənzimləyicinin giriş gərginliyinin 12V, dayaq gərginliyinin isə 30V qiymətlərində yük müqavimətinin 7Ω -dan 5Ω -a dəyişməsi vəziyyətində keçid xarakteristikaları təsvir edilmişdir.



Şəkil 11. Yük müqavimətinin 7Ω qiymətində keçid xarakteristikası



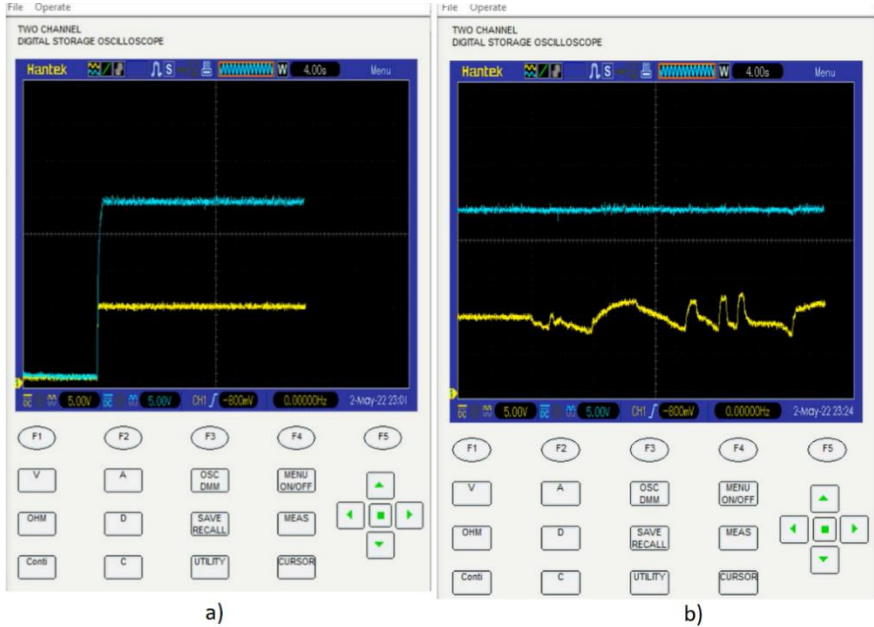
Şəkil 12. Yüklü müqavimətinin 5Ω qiymətində keçid xarakteristikası

Simulyasiya nəticələrindən göründüyü kimi, hər iki tənzimləyici 7Ω yüklü müqavimətində qəbul edilə bilən keçid xarakteristikalarına malik olsa da bu müqavimətin 5Ω -a azalması vəziyyətində klassik xətti PİD tənzimləyici arzu edilən dayaq gərginliyini izləyə bilməməklə qeyri-stabil xarakteristika nümayiş etdirmişdir. Yaxşılaşdırılmış PİD tənzimləyicili SC mikroşəbəkələrinin fiziki modelinin qurulması üçün seçilmiş STM32F407ZE mikrokontroler modulu seçilmişdir.

Şəkil 13(a)-da fiziki MFO-PİD tənzimləyicinin keçid xarakteristikaları ($25V$ dayaq gərginliyi) nümayiş etdirilmişdir. Verilənlər çeviricinin giriş və çıxışına qoşulmuş “HANTEK DSO5202P” real ossiloqrafından əldə edilmiş və kompüterə ötürülmüşdür. SC çeviricisinin girişinə $12V$ voltluq vahid təkan signalı verilmiş və çıxışda dayaq signalı $25V$, 0.05% dəqiqliklə uğurla izlənmişdir. Qeyd edək ki, sarı rəng burada giriş signalına, mavi rəngli signal isə tənzimlənən çıxış gərginliyinə müvafiqdir.

Şəkil 13(b)-də çeviricinin girişinə $12V$ ətrafında təsadüfi gərginlik variasiyaları verilmiş və çıxışda dayaq signalının stabilliyi $25V$, 0.065% dəqiqliklə qorunmuşdur. İstər keçid, istərsə də giriş

gərginliyi variasiyaları sınaqlarında PİD tənziyləyicinin sazlanma parametrləri adaptiv olaraq dəyişmişdir.



Şəkil 13. İşlənmiş MFO-PID tənziyləyicinin fiziki modelinin a) keçid xarakteristikaları (25V dayaq gərginliyi), b) giriş gərginliyi variasiyasında statik çıxış xarakteristikası

Lokal səviyyədə SC çeviriciləri arasında çıxış güclərinin paylanma fərqlərini minimallaşdırmaq üçün virtual müqavimətlər metodu seçilmiş və optimallaşdırılmışdır. Bu metod çeviricilərin çıxış cərəyanı və gücünün artırılıb-azaldılması üçün hər bir çeviricinin çıxışına fiziki olmayan virtual müqavimətlərin qoşulmasına əsaslanır. Virtual müqavimətlərin qiymətlərinin dəyişdirilməsi ilə çeviricilərin çıxış güc və cərəyanının qiymətlərini tənziyləmək mümkündür. Ənənəvi virtual müqavimətlər metodunda, virtual müqavimətlərin qiyməti statik xarakter daşıyır, əvvəlcədən şinə paralel strukturda qoşulmuş hər bir çevirici üçün fərdi qaydada müəyyən olunur və real-zamanda adaptiv olaraq dəyişdirilmə imkanına malik deyildir. Bu

səbəbdən gücün real-zamanlı dinamik paylanmasına imkan vermir. Dinamik proseslər zamanı çeviricilər arasında gücün paylanma fərqlərinin minimallaşdırılması üçün virtual müqavimətlərin də real-zamanda adaptiv tənzimlənməsinə ehtiyac olması müəyyənləşdirilmişdir.

İki çeviricili virtual müqavimətlərə əsaslanan kontrollerin riyazi modeli aşağıda verilmişdir:

$$U_{jYENİDAYAQ} = U_{jDAYAQ} - I_j R_{VMj}, \quad (12)$$

$$\Delta U_{SC} = |U_{SCdayaq} - U_{SC}| \leq \Delta U_{SCmaks}. \quad (13)$$

Burada tənzimlənən dayaq gərginlikləri (U_{1DAYAQ} , and U_{2DAYAQ}), çıxış cərəyanları (I_1 and I_2), virtual müqavimətlər (R_{VM1} and R_{VM2}), ilə işarə edilmişdir. ΔU_{SC} -çıxış gərginliyinin xətası, ΔU_{SCmaks} isə çıxış gərginliyinin xətasının maksimum qiymətidir.

Buraxıla bilən gərginlik hədləri üçün virtual müqavimətin qiyməti aşağıdakı düsturla verilmişdir:

$$R_{VMj} = \frac{(U_{jDAYAQ} - U_{jYENİDAYAQ})_{max}}{I_j} \quad (14)$$

SC çeviricilərinin çıxış gücləri arasında paylanma fərqlərini minimallaşdırmaq üçün intellektual metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə optimallaşdırılmış virtual müqavimətlər (VM) metodu əsaslı üsul işlənmişdir. MFO-VM üsulu üçün işlənmiş məqsəd funksiyası SC çeviricilərinin çıxış güclərinin orta-kvadratik meyletmə qiymətinin 0-a yaxınlaşdırılmasına əsaslanır.

MFO ilə optimallaşdırılmanın həyata keçirilməsi üçün məqsəd funksiyasının qurulmasına ehtiyac vardır. Məqsəd funksiyasının iki əsas mərhələdə qurulmuşdur. Birinci mərhələdə çıxış cərəyanları arasında fərqlərin minimallaşdırılması məsələlərinə baxılmışdır. Fərz edək ki, müvafiq çıxış cərəyanları ($I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$) olan n ədəd SC-SC çeviricisi mövcuddur. Qarşıya qoyulan əsas məqsəd çıxış cərəyanları arasındakı fərqi azaltmaq üçün bu çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletmə qiymətini MFO alqoritmi ilə minimallaşdırmaqdır. İşlənmiş məqsəd funksiyasının ilk həddi aşağıda verilmişdir:

$$\min \sigma_I = \sqrt{\frac{\sum(I_j - \bar{I})^2}{N}} = \sqrt{\frac{(I_1 - \bar{I})^2 + (I_2 - \bar{I})^2 + \dots + (I_N - \bar{I})^2}{N}}. \quad (15)$$

Burada, σ_I – çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsi; I_j – j -ci çeviricinin cari çıxış cərəyanı; \bar{I} – N ədəd çeviricinin çıxış cərəyanlarının orta qiymətidir.

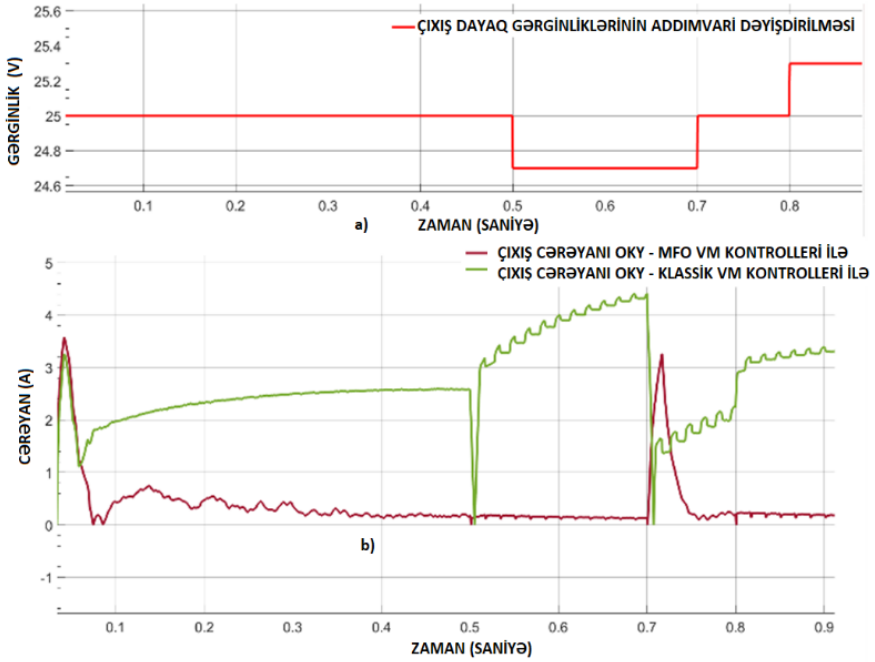
Bununla belə çıxış cərəyan fərqlərinin azaldılması şin gərginliyinin arzuolunmaz dəyişmələrinə səbəb olur. Gərginlik və cərəyan variasiyaları arasında balansın qorunması üçün, əlavə olaraq gərginlik xətlərini aradan qaldıran riyazi hədd əlavə edilmişdir. İkinci mərhələdə çıxış cərəyanlarının orta kvadratik meyletməsinin minimallaşdırılması ilə yanaşı çeviricilərin cari çıxış gərginlikləri ilə dayaq gərginlikləri arasındakı fərqin də azaldılmasına baxılmışdır. İşlənmiş məqsəd funksiyasının yenilənmiş forması aşağıda verilmişdir:

$$\min z = \sqrt{\frac{\sum(I_j - \bar{I})^2}{N}} + \frac{1}{N} \sum |U_{\text{çix.day.J}} - U_{\text{çix.J}}|. \quad (16)$$

Burada, $U_{\text{çix.day.J}}$ – j -ci çeviricinin dayaq gərginliyi, $U_{\text{çix.J}}$ – cari çıxış gərginliyidir.

Aparılmış sınaqlarda ənənəvi və təklif edilmiş MFO-PİD üsulu ilə idarəolunan çeviricilərin çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletmə əyriləri müqayisəli formada verilmişdir. Hər iki çevirici eyni şinə qoşulmuşdur. İkinci çeviricinin dayaq gərginlikləri çeviricilərinin çıxış gərginliklərində süni fərq yaratmaq üçün ± 0.25 V addımı ilə zamana görə dəyişdirilmişdir.

Şəkil 14(b)-də çeviricinin çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsinin (OKY) statik və adaptiv parametrlı VM kontrolleri göstərilmişdir. Daha yüksək çıxış göstəricilərinə malik adaptiv parametrlı VM kontrollerin OKY-sı 0-a yaxınlaşsa da, statik əmsallı VM kontrollerin OKY-sı 2 ətrafında qərarlaşmışdır. Çeviricilərin çıxış dayaq gərginlikləri, Şəkil 14(a) təsvir edildiyi kimi, 24.75V-dan 25.25V-a kimi dəyişdirilmişdir.



Şəkil 14. Çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsi

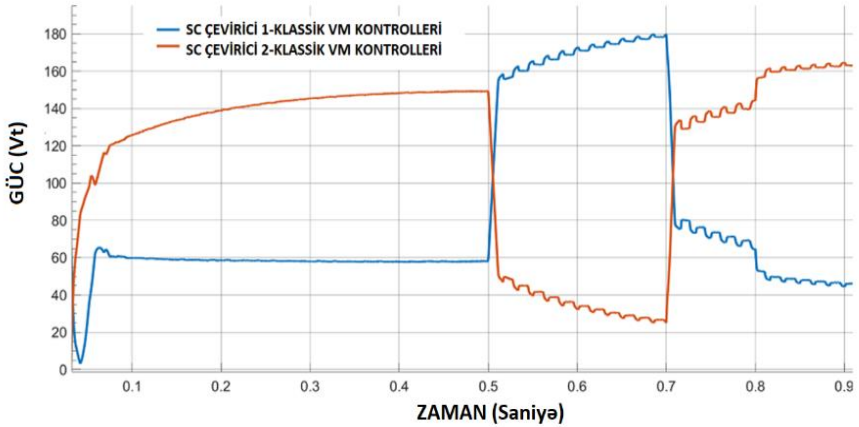
Ənənəvi VM idarəetmə ilə müqayisədə, MFO-VM metodu ilə cərəyanın paylanma xətasının minimallaşdırılmasına nail olmuşdur. Nəticələrdən görüldüyü kimi təklif edilmiş MFO-VM kontrolleri ilə güc paylanması xətası ənənəvi VM kontrolleri ilə güc paylanması xətası ilə müqayisədə çox kiçikdir. Simulyasiyanın ədədi nəticələri isə cədvəl 1-də verilmişdir.

Cədvəl 1

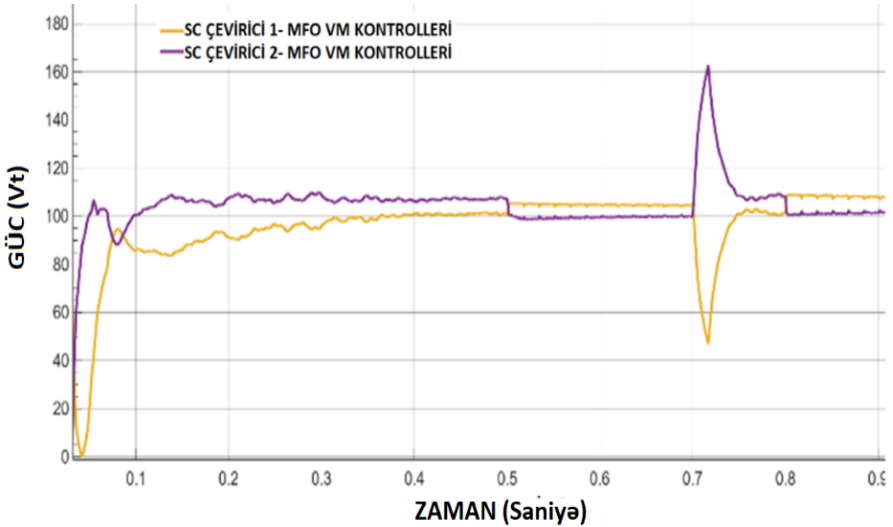
Ənənəvi və MFO-VM kontrollerlərin müqayisəli simulyasiya nəticələri

Dayaq gərginlikləri	25 V	24.75 V	25.25 V
Cərəyanın OKM (OKY)-si	2.35/0.4	4/0.2	3.4/0.25
Orta cərəyan fərqi (A)	3.4 /0.15	5.5/2	4.6/0.35
Orta güc fərqi (Vt)	80/6	140/7.8	110/8
Orta gərginlik fərqi (V)	0.05/0.01	0.2/0.23	0.1/0.12

Şəkil 15 və Şəkil 16-da ənənəvi və MFO-VM kontrolləri çeviricilərin çıxış gücləri arasındakı fərqlər nümayiş etdirilmişdir.

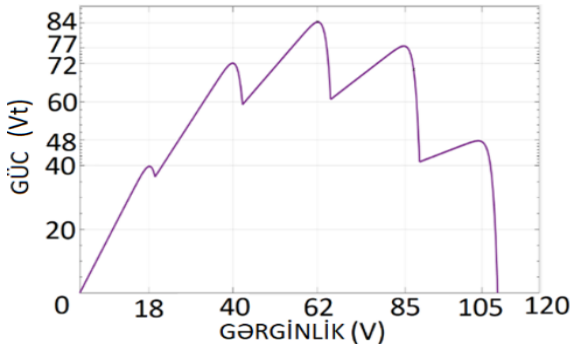


Şəkil 15. Ənənəvi VM kontrolləri ilə işləyən çeviricilərin çıxış güc ayrılırları



Şəkil 16. Yeni MFO-VM kontrolləri ilə işləyən çeviricilərin çıxış güc ayrılırları

Bu fəsildə həmçinin ənənəvi maksimum güc nöqtəsini izləmə (MGNİ) metodları müqayisəli təhlil edilmiş və yarımkölgə fiziki hadisəsinin təsiri altında FV modullarının çıxış xarakteristikalarında çoxsaylı ekstremumların yaranması müşahidə edilmişdir. Ənənəvi üsulların çox-ekstremumlu xarakteristikalarda qlobal maksimumu bir çox hallardan tapa bilmədiyi sınaqlarla müəyyən edilmişdir. Şəkil 17-də fotovoltaiik modulun çıxış güc-gərginlik xarakteristikasını təsvir edilmişdir.

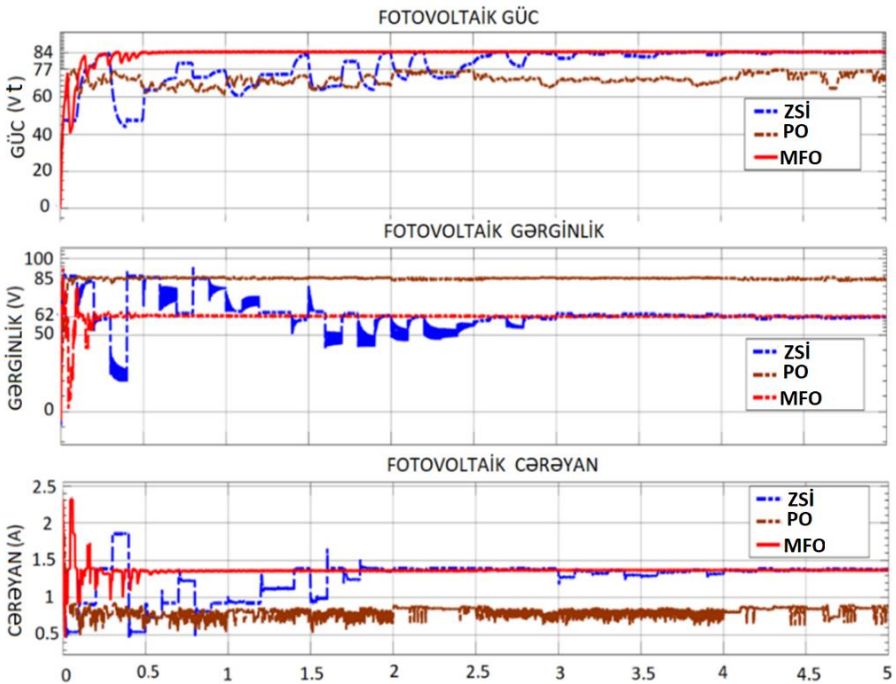


Şəkil 17. Yarımkölgə şəraitində FV modulların çıxış xarakteristikası

Metaevristik optimallaşdırma metodlarının çox ekstremumlu funksiyalarda maksimum nöqtənin tapılmasında effektiv olmasını nəzərə alaraq, verilmiş məsələ üçün metaevristik alqoritmin seçilməsi daha məqsədəuyğun hesab edilmişdir. İşlənmiş MFO-MGNİ metodunun effektivliyini nümayiş etdirmək üçün, ənənəvi pertubasiya və zərrəciklərin sürü intellekti əsaslı ZSİ-MGNİ kontrollerləri işlənmiş və simulyasiyalar aparılmışdır. Seçilmiş bütün fotovoltaiik modullar identik olub, yarımkölgə şəraiti ilə imitasiya edilmişdir. MGNİ kontrolleri fotovoltaiik modulun çıxış gərginliyi və cərəyanını ölçərək maksimum güc nöqtəsinin təyini üçün MFO alqoritmindən istifadə edir. Kontrollerlər maksimum nöqtəni izləmə qabiliyyətinin qiymətləndirilməsi üçün müəyyən sınaqlardan keçirilmişdir. Qrafikdən görüldüyü kimi maksimum güc 84 Vt-a 62 V-da nail

olunmuşdur. Lokal maksimumlar isə 18V-da 40 Vt, 40V-da 72Vt, 85V-da 77 Vt və 105V-da 48 Vt kimi müşahidə edilmişdir.

Şəkil 18-də hər üç kontroller tərəfindən izlənilmiş fotovoltaiik çıxış gücünün simulyasiya nəticələri verilmişdir. MFO və zərrəciklərin sürü intellektinə əsaslanan (ZSİ) MGNİ kontrollerləri qlobal maksimum nöqtəsi olan 84Vt-ı izləyə bilsələr də ZSİ-MGNİ alqoritmi lokal maksimumda ilişərək 77 Vt qiymətini əldə etmişdir. Baxmayaraq ki, ZSİ və MFO-MGNİ kontrollerləri hər ikisi qlobal maksimumu aşkar edə bilmişdir, təklif edilmiş MFO alqoritmi buna qərarlaşma müddətinin 0.6 saniyəsi ilə nail olmuşdur. ZSİ-MGNİ kontrollerində isə qərarlaşma müddəti 5 dəfə çox, yəni 3 saniyə olmuşdur. Maksimum gücün müşahidə olunduğu gərginlikləri ZSİ, MFO və pertubasiya kontrollerində müvafiq olaraq 62 V, 62 V və 85 V-dır.



Şəkil 18. MGNİ kontrollerlərinin yarımkölgə şəraitində çıxış xarakteristikası

Ölçmələrin ədədi qiymətləri isə müvafiq olaraq cədvəl 2-də verilmişdir.

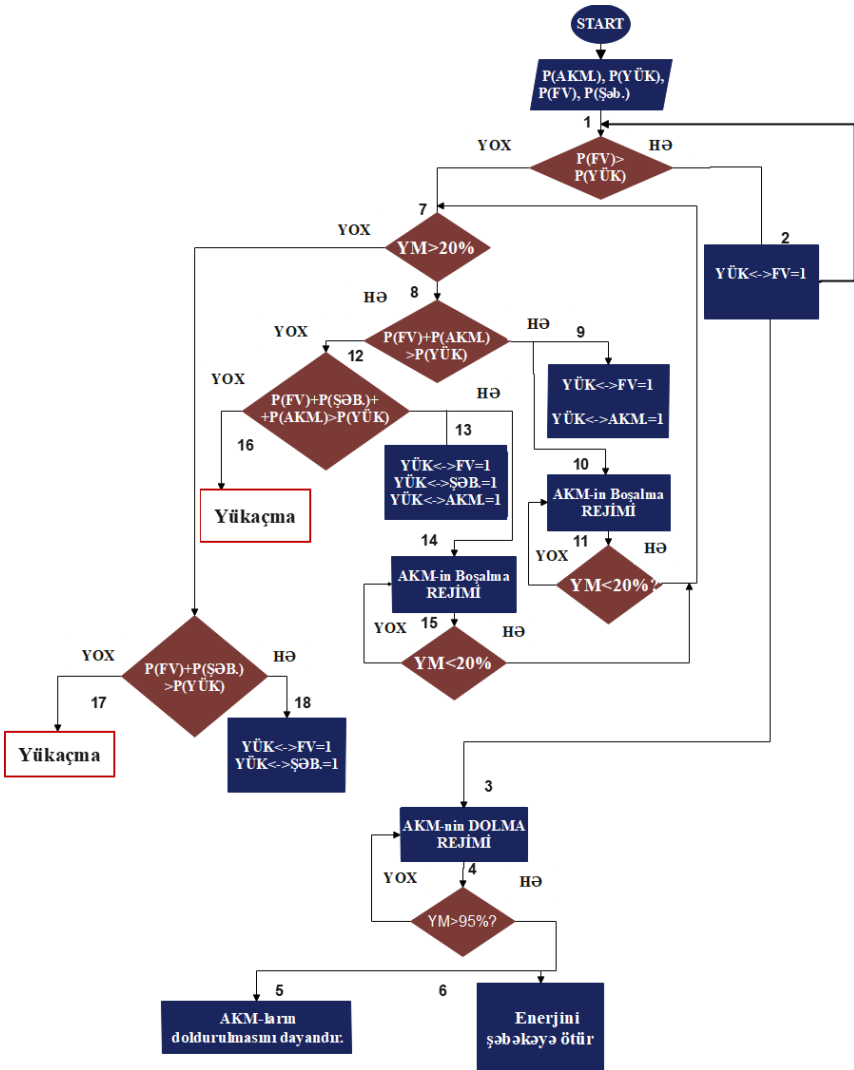
Cədvəl 2

ZSİ, Pertubasiya və MFO-MGNİ kontrollerlərinin müqayisəli ölçmə nəticələri

MGNİ kontrollerləri	Pertubasiya a	ZSİ	MFO
İzlənən maksimum güc	61-77 Vt	84 Vt	84 Vt
Gərginlik	85 V	62 V	62 V
Nisbi yaxınlaşma sürəti	Aşağı	Orta	Sürətli

Mikroşəbəkənin mərkəzi intellektual idarəetmə sisteminin digər əhəmiyyətli vəzifələrindən biri də yük dövrəsinin fasiləsiz enerji təminatını həyata keçirməkdir. Lakin bəzi hallarda FV modulların çıxış güclərinin cəmi yük dövrəsinin fasiləsiz enerji təminatı üçün kifayət olmaya bilər. Akkumulyatorların və dövlət enerji şəbəkəsinin əsas məqsədi bu kimi hallarda tələb edilən gücün yük dövrəsinə çatdırılmasını həyata keçirməkdir. Burada $\sum_1^N P_{FV}$ - FV modullarının çıxış güclərinin cəmi, $\sum_1^N P_{AKM}$ - akkumulyatorların çıxış güclərinin cəmi, $P_{\text{ŞƏB}}$ - şəbəkə gücü, $\sum_1^N P_{YÜK}$ - yük dövrlərinin tələb etdiyi gücdür. Mərkəzi kontroller, $\sum_1^N P_{FV}$, $\sum_1^N P_{AKM}$, $P_{\text{ŞƏB}}$, $\sum_1^N P_{YÜK}$ -ün qiymətlərindən asılı olaraq, yük dövrəsinə müvafiq enerji mənbələrinin qoşulması həyata keçirilir. Qoşulmanın məntiqi vəziyyət qiyməti 1- müvafiq mənbənin yük dövrəsinə qoşulduğunu, 0-isə mənbənin yük dövrəsindən ayrıldığını göstərir. Akkumulyatorlar isə dolma (+1 məntiqi vəziyyəti), boşalma (-1 məntiqi vəziyyəti) və gözləmə (0 məntiqi vəziyyəti) ilə xarakterizə edirlər. Akkumulyatorların yük miqdarına yuxarı və aşağı hədlərinin idarəetmə prosesində nəzəri alınması ilə onların həddindən artıq dolma və boşalma məsələlərinin qarşısını almaq imkanı verir. Bu da akkumulyatorların uzunömürlülüyünün artırılmasına xidmət edir. Təklif edilmiş alqoritmin əsas üstünlüyü isə hasil edilən güc ilə tələb edilən güc arasında balansı qorumaq qabiliyyətidir. Şəkil 19-da SC

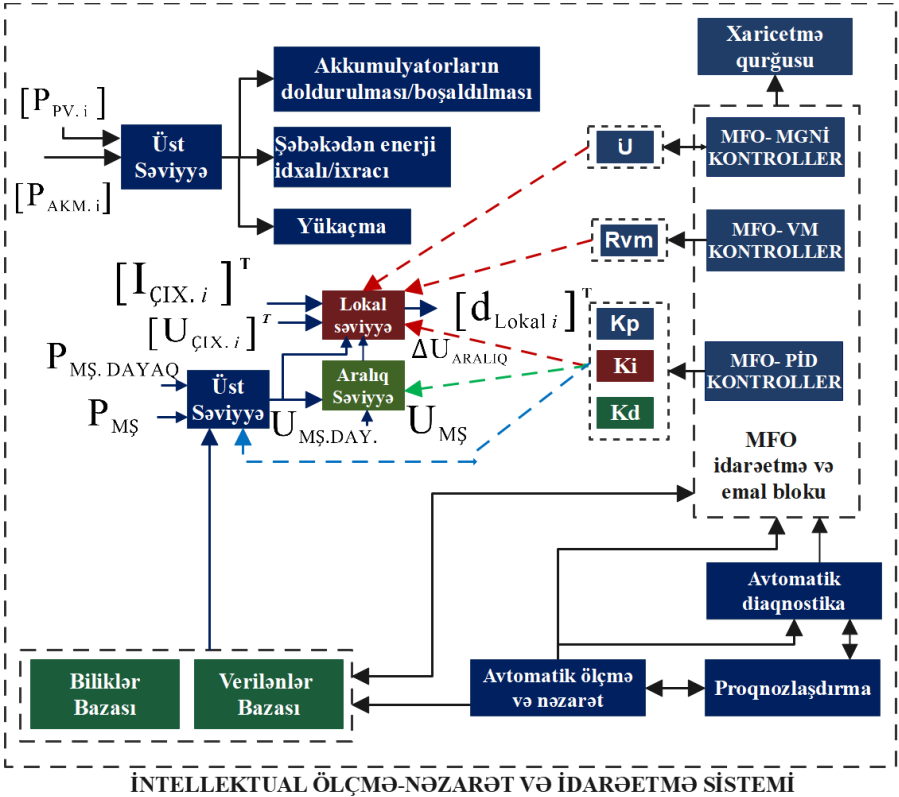
mikroşəbəkənin enerji axımının təklif edilmiş idarəetmə alqoritmi təsvir edilmişdir.



Şəkil 19. Sabit cərəyan mikroşəbəkəsində enerji axımının təklif edilmiş idarəetmə alqoritmi

Modelin digər üstünlüyü isə sabit şin gərginliyi ilə akkumulyatorların dolma və boşalma əməliyyatlarının yerinə yetirilməsidir ki, bu da şin gərginliyinin stabilliyinin artırılmasına hesablanmışdır.

Şəkil 20-də SC mikroşəbəkələrinin təklif edilmiş yeni intellektual ölçmə-nəzarət və idarəetmə sisteminin funksional modeli təsvir edilmişdir.



Şəkil 20. Sabit cərəyan mikroşəbəkələrinin intellektual ölçmə-nəzarət və idarəetmə sisteminin yeni funksional modeli

Dissertasiya işində sabit cərəyan mikroşəbəkələrinin intellektual ölçmə-nəzarət və idarəetmə sisteminin yeni funksional modeli işlənmişdir. Ümumiləşdirilmiş funksional modelə aşağıdakı əsas funksional bloklar daxildir:

- 1) MFO-PİD tənzimləyiciləri,
- 2) MFO-VM kontrolleri,
- 3) MFO-MGNİ kontrolleri,
- 4) Proqnozlaşdırma,
- 5) Avtomatik-ölçmə və nəzarət,
- 6) Diaqnostika,
- 7) Verilənlər və biliklər bazası.
- 8) İdarəetmənin lokal, üst və aralıq səviyyələri.

FV modullardan hasil edilən maksimum gücün qiymətinə əsasən idarəetmənin üst səviyyəsi, aşağı səviyyələr üçün müvafiq idarəetmə siqnalları yaradır. Avtomatik-ölçmə və nəzarət sisteminin əsas məqsədi mikroşəbəkənin gərginlik, cərəyan, yük miqdarı, həmçinin FV modulların və akkumulyatorların temperaturu kimi parametrlərinin daim ölçülməsini həyata keçirmək və onların müəyyən edilmiş buraxılabilən interval daxilində olub-olmadığına nəzarət etməkdir.

DISSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

Dissertasiya işində əldə edilmiş əsas elmi nəticələr aşağıdakı kimidir:

- 1) Optimal idarəetmənin yerinə yetirilməsi üçün çıxış cərəyanlarının orta-kvadratik meyletməsinin və şin gərginliyi xətlərinin intellektual metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə minimallaşdırılması məsələsi həll edilmişdir [5,6];
- 2) SC mikroşəbəkələri üçün intellektual informasiya-ölçmə və idarəetmə sisteminin yeni struktur-funksional modeli işlənmişdir [12];
- 3) SC mikroşəbəkənin intellektual idarəetmə sisteminin işlənməsi üçün fotovoltaiq modullara qoşulmaq üçün bir istiqamətli SEPİK sxemli, akkumulyatorla interfeysin təşkili üçün iki istiqamətli SEPİK-ZETA sxemli çeviricilərin seçilmə səbəbləri əsaslandırılmış, onların müvafiq vəziyyət tənlidləri və ötürmə funksiyaları işlənmişdir [1,2,10,11];
- 4) SC mikroşəbəkələrində meydana gələn sirkulyasiya cərəyanlarının riyazi modeli işlənmişdir [5,6];
- 5) Ənənəvi və metaevristik optimallaşdırma üsullarının müqayisəli təhlili aparılmış və mikroşəbəkənin idarəetmə sisteminin intellektual modelinin qurulması üçün metaevristik MOS-FLEYM alqoritminin seçilmə səbəbləri əsaslandırılmışdır [3,4,5,6,8,14];
- 6) Mikroşəbəkənin hər üç idarəetmə səviyyəsinin PİD tənzimləyicilərinin intellektuallaşdırılması məsələsi həll edilmişdir [1,2,3,4];
- 7) Xarakteristikaları yaxşılaşdırılmış intellektual PİD tənzimləyicisinin “STM32F407” mikrokontrolleri əsasında fiziki modeli realizə edilmişdir [1,2,4];
- 8) Fotovoltaiq modulların çıxış parametrlərinin ölçmə nəticələri əsasında maksimum çıxış gücünün əldə edilməsinə imkan verən metaevristik MOS-FLEYM alqoritmlə maksimum güc nöqtəsini izləyən yeni üsul işlənmişdir [5,7];

- 9) Mikroşəbəkələrin intellektual idarəetmə sisteminin ümumiləşdirilmiş funksional modeli işlənmişdir [4,5,7];
- 10) Sabit cərəyan mikroşəbəkələrində yük dövrlərinin fasiləsiz enerji ilə təmin olunması üçün mikroşəbəkənin daxili funksional blokları, eləcə də bu mikroşəbəkənin başqa mikroşəbəkələrlə və ya dövlət enerji şəbəkəsi ilə optimal enerji mübadiləsini həyata keçirmək imkanına malik olan intellektual idarəetmə sisteminin yeni funksional modeli işlənmişdir [9,10,12,13,15].

Dissertasiya işinin mövzusunə dair dərc olunmuş elmi əsərlərin siyahısı

1. Yusubov E. and Bakirova L., «A Self-Tuning Fuzzy PID Controller for SEPIC Based on Takagi-Sugeno Inference System,» International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 2021, pp. 54-57, doi: 10.1109/ICAI52893.2021.9639804.
2. Yusubov E. and Bakirova L. “ Design and Simulation of the Auto-Tuning TS-Fuzzy PID Controller for the DC-DC ZETA Converter, “ International Scientific and Practical Conference «Intellectual Systems and Information Technologies», September 13–19, 2021, Odesa, Ukraine ISSN- 1613-0073. <http://ceur-ws.org/Vol-3126/paper36.pdf>
3. Yusubov E. and Bakirova L., A Moth-Flame Optimized Robust PID controller for a SEPIC in Photovoltaic Applications, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 11, 2022, Pages 120-125, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.059> .
4. Yusubov E. and Bakirova L., Development of an improved hierarchical control system using the metaheuristic PID tuner for DC microgrids. Advanced Information Systems, 6(3), 42–47, 2022, ISSN-2522-9052, <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.3.06>

5. Yusubov E. and Bakirova L., «A Robust Metaheuristic Central Controller for the Hierarchical Control System with the Adaptive Power sharing and MPPT in DC Microgrids ‘International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE) Journal, Issue 53, Vol. 14, No. 4, December 2022. <https://www.iotpe.com/IJTPE/IJTPE-2022/IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022/54-IJTPE-Issue53-Vol14-No4-Dec2022-pp392-399.pdf>
6. Yusubov E. and Bakirova L., "Adaptive Metaheuristic Moth-Flame Optimized Droop Control Method for DC Microgrids," 2022 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 2022, pp. 204-209, doi: 10.1109/ICAI55857.2022.9960119
7. Yusubov E. and Bakirova L., "Metaheuristic Maximum Power Point Tracking for PV systems under Partial Shading Conditions," 2022 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 2022, pp. 355-360, doi:10.1109/ICAI55857.2022.9960006.
8. Yusubov E., “Metaheuristic optimized DC microgrids”. The third international scientific – practical conference – modern information, Measurement, and control systems: problems, applications and perspectives (MIMCS- 2022), pp.26, ASOIU, 2022. <https://zenodo.org/records/8217335>
9. Mammadov R., Aliew F., Yusubov E., “Development of a power stability system”. The third international scientific – practical conference – modern information, Measurement, and control systems: problems, applications and perspectives (MIMCS- 2022),p.9, ASOIU, 2022. <https://zenodo.org/records/8217335>
10. Yusubov, E., and Bekirova, L. The optimized power flow control system for the photovoltaic DC microgrid. E3S Web of Conferences, 404, 03001. 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340403001>
11. Yusubov, E., Selection of the non-isolated unidirectional dc-dc converters for photovoltaic applications. Proceedings of

- Azerbaijan High Technical Educational Institutions, Volume 33 (04) ISSUE 10 2023, pp 110-120, ASOIU, Baku, Azerbaijan, 2023. <https://zenodo.org/records/8338483>
12. Yusubov, E., Design of an intelligent information measurement system for photovoltaic dc microgrids. Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions, ASOIU, Volume 34, Issue 11, pp 54-64, 2023. <https://zenodo.org/records/10062961>
 13. Yusubov, E., Bakirova L., A load-shedding mechanism using the binary number generator in photovoltaic DC microgrids. iSCSi'23 - International Conference on Industry Sciences & Computer Sciences Innovation, Lisbon, Portugal, 04.10.2023.
 14. Khudaverdiyeva M., Yusubov E., Ismayil S., A Fuzzy Controller for a Mobile Robot with Obstacle Avoidance 3rd « Proceedings of the international research, education & training center”, The Baltic Scientific Journal, volume 27 issue 06, ISSN: 2613-5817; e-issn:2613-5825, 2023, doi prefix: 10.36962/piretc
 15. Yusubov, E., Bakirova L., A Standalone DC Microgrid Energy Management Strategy Using The Battery State Of Charge. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska, Poland, 3/2023, pp 75-78. <http://doi.org/10.35784/iapgos.5320> .

Həmmüəlliflərlə birgə işlərdə iddiaçının şəxsi fəaliyyəti:

[1-4,14]- Kompleks, qeyri xətti proseslərdə idarəetmə məsələləri, PİD tənzimləyicilərin qeyri-xətti sistemlərdə xarakteristikalarının tədqiqi, çeviricilərin vəziyyət tənlilikləri və ötürmə funksiyalarının işlənməsi, simulyasiyaların aparılması, PİD tənzimləyicilərin metaevristik MOS-FLEYM alqoritmi ilə optimallaşdırılması;

[6]- Mikroşəbəkənin lokal idarəetmə səviyyəsində meta-evristik mərkəzi kontroller üçün orta-kvadratik meylətməsinin iterativ

azaldılmasına əsaslanan məqsəd funksiyasının işlənməsi və kompüter simulyasiyası;

[7]- Metaevristik MOS-FLEYM optimallaşdırma metodu ilə yarımkölgə şəraitində güc elektronika çeviricilərinin maksimum güc izləmə kontrollerinin işlənməsi;

[9, 10, 13, 15]-Mikroşəbəkədə tələb edilən və generasiya edilən güc balansının saxlanılması üçün idarəetmə sisteminin yeni funksional modelin işlənməsi;

[4, 5]- Sabit cərəyan mikroşəbəkəsinin iyerarxik idarəetmə sisteminin metaevristik optimallaşdırılması, kompüter simulyasiyaları, yeni struktur-funksional modelin işlənməsi, mikroşəbəkənin enerji yığıma və idarəetmə sisteminin işçi rejimlərinin müəyyən olunması;

Dissertasiyanın müdafiəsi ____ _____ 2024-cü il tarixdə saat _____-da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.04 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: Az 1073, Bakı şəhəri, Hüseyn Cavid prospekti, 25.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Texniki Universitetin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Texniki Universitetin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat ____ _____ 2024-cü il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 28.02.2024

Kağızın formatı: A5

Həcm: 38367

Tiraj: 100